



# Le fonctionnement d'un four de réduction daté de l'âge ancien du Fer (Koussané, bassin supérieur du Sénégal, Mali)

Christian Dupuy

## ► To cite this version:

Christian Dupuy. Le fonctionnement d'un four de réduction daté de l'âge ancien du Fer (Koussané, bassin supérieur du Sénégal, Mali). Colloque Les Chemins du Fer en Belledonne Isère – Savoie, Equipe du Grand Filon et Bien Vivre en Val Gelon, May 2013, Allevard - Arvillard, France. halshs-01120807

**HAL Id: halshs-01120807**

**<https://shs.hal.science/halshs-01120807>**

Submitted on 26 Feb 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Colloque

Les Chemins du Fer en Belledonne  
Isère – Savoie (Allevard – Arvillard)  
22-25 mai 2013

## **Le fonctionnement d'un four de réduction daté de l'âge ancien du Fer (Koussané, bassin supérieur du Sénégal, Mali)**

Christian Dupuy  
Institut des Mondes Africains, Paris (IMAf, UMR 8171)  
Université Tous Âges, Lyon  
Université Pour Tous, Saint-Étienne

### Résumé :

Un décapage horizontal de 35 m<sup>2</sup> sur le gisement archéologique de Koussané a permis la mise au jour de vestiges sidérurgiques en relation avec une opération de réduction directe d'un minerai de fer siliceux. Deux fragments de charbon de bois inclus dans de la scorie ont fourni un âge C<sup>14</sup> de 1715 ± 55 BP en accord avec la chronostratigraphie. Le four utilisé pour cette opération se composait d'une fosse peu profonde légèrement hémisphérique surmontée d'une cellule maçonnée à base de colombins et enduite d'argile. Tant la forme que la hauteur de cette superstructure s'avèrent indéterminables à partir des vestiges. Une tuyère disposée obliquement à travers le corps du four et associée à des soufflets, a favorisé la formation d'une éponge de fer au dessus de la scorie liquide comme le révèlent les examens métallographiques. Cette dernière s'est solidifiée dans la fosse en un bloc de 90 kg. A la suite de quoi la construction en élévation a été déplacée de deux à trois mètres pour permettre le prélèvement de l'éponge de fer. Les analyses chimiques effectuées sur le minerai et la scorie permettent d'estimer autour de 11,5 kg la masse de métal brut produit.

Mots clés : Sahel – Vestiges métallurgiques – Réduction – Fer – Datations – Métallographie – Spectrométrie – Bilan matière.

### Introduction

Des prospections archéologiques menées en 1993 dans la vallée de la Kolimbiné, un affluent de la rive droite du Sénégal à hauteur de Kayes (fig. 1)<sup>1</sup>, conduisent à la découverte d'une scorie de fer massive sur un front d'érosion entaillant des terrains de culture en pente douce situés à l'ouest du village de Koussané (fig. 2). Un sondage est réalisé. Un charbon retrouvé à proximité immédiate de cette scorie sous 50 cm d'un sol sablo-silteux, fournit l'âge C<sup>14</sup> de 2520 ± 70 BP (Gif-9585), soit après correction dendrochronologique, un âge compris entre -800 et -420 av. J.-C. (95% de confiance). Afin de savoir si la scorie est contemporaine de ce charbon – ce qui en ferait dans ce cas l'un des vestiges de métallurgie du fer parmi les plus anciens de l'Afrique de l'Ouest<sup>2</sup> – une fouille sur 35 m<sup>2</sup> est réalisée en 1995. Deux publications ont déjà été

<sup>1</sup> Cf. figures en fin de texte (p. 14-19).

<sup>2</sup> Des fours de réduction, des scories, des fragments de tuyères et/ou des menus objets en fer apparaissent au cours des cinq derniers siècles av. J.-C., dans plusieurs sites du Nigeria central appartenant à la culture de Nok (Breuning 2009 ; Eggert 2014 ; Fagg 1969 ; Tylecote 1975), mais aussi, plus au nord et plus à



consacrées à ces recherches. La première présente les datations obtenues (Dupuy et Rolando 1999), la seconde les vestiges métallurgiques mis au jour (Dupuy et *al.* 2001-2002). Cette étude a vocation technologique ; elle vise à cerner, données archéologiques et archéométriques à l'appui, les faits et gestes des métallurgistes qui ont travaillé dans le secteur fouillé.

## 1. L'occupation du site

### 1.1 – La présence de métallurgistes fondeurs

Les premiers vestiges apparaissent 30 à 50 cm sous le sol actuel (fig. 3). Les plus volumineux consistent en quatre grosses scories groupées sur quelques mètres carrés. Deux d'entre elles sont attenantes à une nappe de matériaux argileux cuits s'étalant sur 3 m<sup>2</sup>, recoupée par le front d'érosion. Se trouvent mêlés dans cette structure de quelques centimètres d'épaisseur, des fragments plus ou moins érodés de boudins de 4 cm de diamètre, des morceaux de tuyères en partie scoriacées et des plaquettes de glaise bosselées d'un côté, planes de l'autre ; une planéité produite par desquamation de l'argile sous l'effet d'une exposition à des températures élevées. Cet imbroglio de matériaux représente les restes d'une construction à base de colombins qui avait été revêtue d'argile, qui était liée à des tuyères et qui, après abandon, s'est effondrée sous les intempéries. Des vestiges de taille réduite apparaissent dispersés à son entour. Ils consistent :

- en des petites scories, soit grises, déchiquetées et de texture vacuolaire, soit en forme de gouttelettes, le tout pesant au total près de 5 kg ;
- en 70 morceaux de tuyères blanchâtres ou rubéfiés, quelquefois scoriacés (ces chiffres tiennent compte des fragments inclus dans la nappe de vestiges argileux décrite ci-dessus),
- en une vingtaine de cailloux polyédriques de 2 à 5 cm de côté, de texture grenue, attirés par l'aimant, montrant des faces scoriacées et des fissures. Ces stigmates permettent de les identifier à du minerai de fer probablement extrait des formations gréseuses affleurant autour de Koussané dans une carrière qui reste à découvrir. La préparation de ce minerai par concassage s'est effectuée en dehors du périmètre de fouille où aucun témoin de débitage n'a été découvert ;
- en une vingtaine de petits tessons d'épaisseur millimétrique montrant des décors variés ;
- en quelques morceaux de grés aux angles émoussés ;
- en quelques éclats de quartz et d'argilite ;
- en un tranchant effilé de hache en argilite.

Le matériel sous-jacent se répartit de façon aléatoire dans 20 à 40 cm de sol. Il comprend près de 600 tessons de poteries de taille centimétrique et d'épaisseur millimétrique, fréquemment érodés et ne se remontant pas entre eux. Leurs décors sont comparables à ceux des tessons du niveau supérieur<sup>3</sup>. Viennent ensuite, par ordre

---

l'ouest, à Walaldé dans la moyenne vallée du Sénégal (Deme et McIntosh 2006) et à Djenné-jeno dans la moyenne vallée du Niger (McIntosh 1994 ; McIntosh et McIntosh 1980). Des âges comparables et parfois beaucoup plus anciens, sont avancés pour des vestiges de métallurgie du fer découverts par ailleurs en Afrique sub-tropicale. Ces résultats n'emportent pas la conviction car ils se réfèrent à des datations C<sup>14</sup> obtenues sur des charbons de bois et/ou sur le dégraissant végétal de poteries dont la contemporanéité avec les vestiges métallurgiques qui leurs sont contigus, n'est pas assurée. Les données radiométriques C<sup>14</sup> et TL enregistrées à Koussané, présentées dans cet article, montrent combien de telles datations doivent être considérées avec prudence pour retracer l'histoire de la métallurgie du fer.

<sup>3</sup> L'étude de cette céramique est en cours.

décroissant d'importance, une cinquantaine d'éclats de quartz et d'argilite, une quinzaine de fragments de grès présentant des surfaces polies et des angles émoussés, quatre morceaux d'une meule en granite incomplète, deux tranchants et un talon de hache ou herminette en pierre.

Seuls les vestiges du niveau supérieur renvoient à une activité métallurgique. La présence de minerai aux côtés de scories massives et des restes d'une construction en terre qui fut exposée à des températures élevées, témoignent d'une opération d'extraction du fer selon la filière de réduction directe en bas fourneaux (Fluzin et *al.* 1995 et 2000 ; Serneels 1993 et 1998). Les absences conjuguées de petites scories en calotte et de battitures excluent tout travail d'épuration et/ou de forge dans la zone fouillée.

## 1.2 – Un millénaire de fréquentation

Des petits fragments de charbons recouvraient la scorie la plus volumineuse du gisement. Leur datation a donné  $1840 \pm 95$  BP (Ly-7124), soit un âge réel compris entre -10 av. J.-C. et 400 apr. J.-C. Cet âge s'avère de cinq à douze siècles plus récent que celui fournit par le charbon mis au jour lors du sondage de 1993. Par ailleurs, des dizaines de charbons de taille centimétrique sont apparus groupés en partie basse du dépôt archéologique. Christiane Rolando les a identifiés à du *Prosopis africana*<sup>4</sup>. Le charbon tiré de ce bois possède un fort pouvoir calorifique. De plus il est peu friable et se consume lentement. C'est pourquoi il est très prisé par les forgerons africains (Echard 1983 ; Eichhorn 2012 ; Huysecom 1996 ; Levy-Luxereau 1983 ; Maydell 1983 ; Seignobos 1991). Deux des charbons de *Prosopis africana* mis au jour ont fourni les âges  $C^{14}$  de  $2920 \pm 45$  BP (Ly-6990) et de  $2895 \pm 45$  BP (Ly-8057), soit des âges réels compris entre -1250 et -940 av. J.-C. Aucun effet « vieux bois » ne peut expliquer les écarts de plus d'un demi millénaire avec les deux autres dates  $C^{14}$  présentées plus haut, étant donné que l'espérance de vie du *Prosopis africana* ne dépasse probablement pas la centaine d'années<sup>5</sup>. Ces écarts ne peuvent non plus se justifier par l'utilisation de vieilles souches comme combustible, tant le bois mort en Afrique sub-saharienne a tôt fait d'être éliminé par l'humidité, les termites et les feux de brousse. Il est tout aussi improbable que des racines ou du bois ensevelis de longue date aient été déterrés pour être brûlés. Quel bûcheron, quel charbonnier ou quel forgeron procède ainsi aujourd'hui ? Finalement, deux hypothèses semblent pouvoir être retenues au regard des datations obtenues et de l'apparement typologique des tessons du niveau supérieur avec ceux sous-jacents :

- soit l'ensemble des vestiges mis au jour a appartenu à une même communauté au sein de laquelle des métallurgistes ont réduit du minerai de fer siliceux à la charnière des II<sup>e</sup>-I<sup>er</sup> millénaires av. J.-C. ou en des temps plus récents,

---

<sup>4</sup> Cet arbre mesure à l'âge adulte une vingtaine de mètres de hauteur pour un diamètre de tronc de l'ordre d'un mètre. Son bois dense et dur montre des cernes de croissance (Mariaux 1979).

<sup>5</sup> Michel Thinson, anthracologue à l'IMEP, m'indique que le *Prosopis africana* est un arbre réputé pour avoir une croissance rapide (lettre du 26-12-2013). De son côté, Jean-Claude Leprun, pédologue à l'IRD, précise que le *Proposis juliflora*, au nord-est du Brésil, devient adulte en moins de 40 ans (lettre du 8-5-2014). Bien qu'on ne dispose d'aucune donnée chiffrée concernant l'espérance de vie de cet arbre en milieux sahélien et soudanien, il y a tout lieu de penser que rares sont les individus de *Prosopis africana* à dépasser la centaine d'années dans les zones peuplées où ils sont régulièrement abattus car prisés pour le pouvoir calorifique élevé de leur charbon.

- soit les charbons de *Prosopis africana* mis au jour ainsi que le matériel lithique et céramique voisin, étaient déjà intégrés dans le sol sur lequel se sont installés des métallurgistes. Dans ce cas, leur venue se situerait entre 2920/2895 BP, âges des charbons sous-jacents aux vestiges métallurgiques, et 1840 BP, âge fourni par les esquilles charbonneuses retrouvées dessus la scorie la plus volumineuse du gisement, peut-être aux alentours de 2520 BP, âge du charbon prélevé lors du sondage au voisinage immédiat et à la base de la scorie apparue en stratigraphie dans la coupe géologique.

### 1.3 – Une opération de réduction datée de 1715 BP

Afin de se prononcer en faveur de l'une ou l'autre de ces possibilités, les scories massives ont été broyées avec l'espoir de trouver d'éventuels charbons prisonniers. Par chance l'une d'elles renfermait deux petits charbons. Un seul a pu être identifié par Christiane Rolando à du *Prosopis africana*. Une datation SMA de ces petits charbons a fourni l'âge de  $1715 \pm 55$  BP (Ly-329/AA-21696), soit 210 à 460 apr. J.-C. Les âges radiocarbone obtenus s'accordent donc avec la position en profondeur des charbons datés. La chronostratigraphie du gisement, par sa cohérence, témoigne d'une histoire qui peut se résumer ainsi.

A l'aube ou au début du I<sup>er</sup> millénaire av. J.-C., le secteur fouillé est fréquenté par des groupes possédant des poteries à parois fines et des outils en pierre. Puis, à un moment ou à un autre entre les III<sup>e</sup>-IV<sup>e</sup> siècles apr. J.-C., des métallurgistes s'installent à cet endroit pour réduire du minerai de fer extrait probablement des grès avoisinants. Le charbon de *Prosopis africana* qu'ils utilisent comme combustible, n'est pas tiré d'une vieille souche mais produit à partir de troncs et de branches abattus ou morts depuis peu puisqu'une fois leur activité terminée, la plus volumineuse des scories produites est recouverte par du sédiment et des esquilles charbonneuses qui accusent sensiblement le même âge que les deux petits charbons retrouvés inclus en son sein. La fouille n'a révélé aucune trace d'habitat, pas même un seul trou de poteau. Cette absence peut tenir au sédiment meuble du gisement qui se prête mal à la préservation des structures en creux, à moins que les métallurgistes aient travaillé en plein air et à ciel ouvert. Au terme de la réduction, ils abandonnent leur atelier. Les déchets de leur activité exposés aux intempéries sont progressivement recouverts par des poussières éoliennes et des colluvions. Les agriculteurs soninkés installés aujourd'hui à Koussané cultivent ces loess en pente douce qui se trouvent soumis à une forte érosion linéaire en raison de la disparition de la couverture végétale provoquée par les défrichements, les feux de brousse et le surpâturage. Les vestiges métallurgiques susceptibles de se trouver encore sous les formations superficielles vont finir par être emportés par les glissements de terrain. La seule manière de déterminer l'âge de ceux qui, un jour ou l'autre, se rencontreront peut-être dans le fond des ravines en position secondaire, passera alors par l'extraction des charbons susceptibles d'être inclus dans des scories.

## 2. Le fonctionnement du four

### 2.1 – Un écoulement vertical de la scorie

La plus grosse scorie mise au jour pèse autour de 30 kg (fig. 4). Deux plans de fracture abrupts déterminent en vue de dessus sa forme en tiers de camembert s'inscrivant dans un cercle de 70 à 75 cm de diamètre. Un embout de tuyère est pris en son centre à 60° par rapport à l'horizontale. Des cordons lisses, étroits, entrelacés et soudés sur une hauteur de 10 à 15 cm confèrent un aspect moulé à son contour. Sa base

légèrement bombée est accidentée à la verticale de la tuyère. Des empreintes de tiges végétales entrecroisées s'observent par endroit. Les cavités ouvertes centimétriques qui les jouxtent, représentent probablement les moulages de charbons de bois disparus par consommation ou par suite de l'activité biologique (bactéries, champignons, insectes...). Auquel cas le charbon était sensiblement du même calibre que le minéral. Le bloc de scorie reposait sur deux plaques sablo-limoneuses rouges partiellement vitrifiées entourées de sédiment chargé en cendre. La présence de ces plaques peut résulter soit du crépissage de la fosse dans laquelle s'est écoulée la scorie, soit de la préexistence de lentilles argileuses dans le sol excavé, ou bien du dépôt d'objets rituels en terre à la base du four qui visait à favoriser la réussite de l'opération métallurgique comme cela se pratiquait au XX<sup>e</sup> siècle dans diverses régions africaines à l'occasion des réductions (Celis 1991 ; De Maret 2002 ; Schmidt 1997). La composition minérale de ces plaques déterminée par diffraction des rayons X a révélé la présence de tridymite, de cristobalite, de maghémite et de fayalite (Vartagnan et *al.* 2000). Ces phases cristallines se forment à des températures au moins égales à 1300°C. Des examens effectués en microscopie électronique à balayage ont montré, en outre, des grains de quartz agrégés aux baguettes de tridymite. Leur datation par thermoluminescence a donné 1670 ± 200 BP. Ce résultat, bien qu'imprécis<sup>6</sup>, s'avère intéressant puisqu'il confirme les données du radiocarbone situant dans le I<sup>er</sup> millénaire apr. J.-C. l'opération métallurgique. Il est également important de noter que les données archéologiques et archéométriques s'accordent pour identifier le déchet métallurgique le plus volumineux du gisement au tiers restant de la scorie qui, portée à plus de 1300°C, s'est écoulée verticalement dans une fosse en cuvette au fond légèrement hémisphérique où elle s'est ensuite solidifiée au contact de ce qui restait d'un bourrage végétal comme le montrent les empreintes de tiges sur sa face inférieure légèrement bombée.

## 2.2 – Des déchets tirés d'un même bloc

Les trois autres scories massives du gisement trahissent-elles la présence de plusieurs fours ? Ou, ont-elles été produites dans un four à usage répété ? Ou bien, résultent-elles d'une unique opération de réduction ? Ni cerne de rubéfaction témoin d'une forte exposition du lœss à la chaleur, ni cendre, n'a été observée à leur contact. Leur partie externe comprend des parties bosselées et lisses montrant par endroit des empreintes de tiges végétales qui s'interrompent sur des faces déchiquetées. Aucun cordon d'écoulement orienté n'est visible à leur surface. Tous ces déchets reposaient au même niveau. Leur masse cumulée de 50 kg est égale à presque deux fois celle de la scorie en portion de camembert amputée aux deux tiers qui pèse, rappelons-le, près de 30 kg. Leur épaisseur est décimétrique comme cette dernière. Ces diverses observations invitent à identifier ces fragments comme les principaux morceaux manquants du bloc de scorie qui s'est solidifié dans le fond du four. Afin de tester cette hypothèse, des examens métallographiques ont été effectués par Philippe Fluzin (1996 et 2000) sur le morceau intégrant l'embout de tuyère à 60° et sur l'un des fragments attenant à la nappe de vestiges argileux qui, à la différence de ses voisins, montrait une cassure franche à éclat métallique vermeil faisant soupçonner la présence sous-jacente de métal.

Concernant le premier déchet incorporant un embout de tuyère, la section analysée révèle à l'échelle macroscopique une compacité homogène (fig. 5a). L'absence de strate témoigne d'un écoulement et d'une solidification de la scorie en une fois. Aucune porosité ne s'observe au voisinage de la tuyère. Celles en partie basse

---

<sup>6</sup> La large incertitude affectant la mesure vient du fait que la radioactivité du milieu d'enfouissement de la plaque soumise au test de databilité par thermoluminescence, n'a pas été mesurée *in situ* mais a été évaluée en laboratoire à partir d'échantillons de sédiment prélevés en fouille.

et en partie haute de la scorie sont éparées, ovoïdes et de petites tailles. Quelques unes ont des dimensions plus importantes. Aucune ne montre de déformation caractéristique d'une solidification en mouvement. La surface inférieure de faible convexité n'incorpore aucun grain de sable. Les cavités ouvertes qui la composent, représentent vraisemblablement des empreintes de charbons de bois. Ces premières observations plaident en faveur d'une accumulation du bain silicaté dans le fond du four et de sa solidification, non pas directement sur le sol, mais sur un tapis de tiges végétales et de cendre. Du métal apparaît en blanc à 10 cm de l'axe de la tuyère en partie haute du bloc, précisément dans le flux d'air amené par elle, à proximité de porosités et de fragments de charbons ayant joué le rôle de puits de diffusion du gaz réducteur, le monoxyde de carbone produit par la combustion lente du charbon. Une éponge de fer a dû logiquement se constituer dans cette partie. De fait, la tuyère à 60° paraît bien dans sa position originelle. Autrement dit, ce qu'il en reste ne peut correspondre à une chute d'embout accidentelle au cours ou à la fin de la réduction. L'examen micrographique, quant à lui, ne révèle aucune réoxydation périphérique au niveau des fragments de métal (fig. 5b). Ceux-ci sont en cours de densification dans une matrice fayalitique entourée de nombreux globules de wustite, laquelle ne se présente jamais sous la forme de dendrite caractéristique d'une cristallisation rapide sous l'effet d'une vitesse de refroidissement importante. Les grandes aiguilles de fayalite dans l'axe de la tuyère impliquent, d'autre part, des températures élevées. Cette observation sous-tend, ici encore, que l'embout pris à 60° est bien dans sa position originelle et, d'autre part, qu'il n'a pas bougé tout au long du refroidissement. La scorie analysée présente un ensemble de caractères typiques des fonds de fours de réduction. Les examens métallographiques viennent ainsi conforter les constats et déductions archéologiques. Mais là n'est pas leur seul intérêt. En effet, ces examens permettent aussi de préciser la marche du four. Par son inclinaison à 60° de haut en bas vers le centre de la fosse, la tuyère a favorisé la formation d'une éponge de fer en partie haute de la scorie. Cette dernière, après solidification et refroidissement, a été brisée, puis disloquée aux deux tiers pour permettre le prélèvement du métal. Etant donné que le fragment demeuré en place pèse à peu près 30 kg, on peut estimer trois fois plus importante, soit autour de 90 kg, la masse de scorie obtenue à l'issue de la réduction. Ce qui correspond *grosso modo* à la masse de déchets récupérée sur l'aire de fouille. Et, ce qui suggère par là qu'aucun déchet de taille significative n'a été emporté par le ravinement avant notre fouille... réalisée à point nommé.

Poursuivons avec les examens métallographiques menés par Philippe Fluzin sur le deuxième spécimen à cassure franche présentant un éclat métallique vermeil. A l'échelle macroscopique, la section analysée révèle une compacité homogène avec une distribution assez aléatoire des porosités aux dimensions comprises entre 2 et 3 mm (fig. 5c). Quelques unes atteignent 15 mm. Toutes sont ovoïdes. Aucune ne montre de déformation caractéristique d'une solidification en mouvement. La face moulée incorpore de nombreux grains de sable. Aucun fragment de charbon de bois n'apparaît sur le plan de coupe. L'examen micrographique révèle une très grande pauvreté en éléments métalliques. Cette observation infirme par conséquent l'hypothèse de métal sous-jacent. Les fragments de fer observés sont sphériques, de petite dimension (30 à 40 µm) et en cohésion avec la matrice. Ils apparaissent isolés et distribués de façon aléatoire. Certains d'entre eux sont localisés à proximité de porosités ayant joué le rôle de puits de diffusion de gaz réducteur, sans être organisés suivant le faciès d'alignements concentriques. Une telle morphologie est souvent associée à des températures élevées obtenues à proximité de tuyères. Aucun fragment de métal ne montre de réoxydation périphérique. La matrice essentiellement fayalitique comporte

de nombreux globules de wustite, laquelle ne se présente jamais sous la forme de dendrite caractéristique d'une vitesse de refroidissement élevée. Sur un plan général, ces observations rapprochent ce spécimen des fonds de four de réduction. De manière plus particulière, les similitudes macro- et microstructurales qui s'établissent avec la scorie intégrant l'embout de tuyère examinée plus haut, tendent à confirmer l'hypothèse de résidus qui se seraient écoulés dans un même fond de four où ils se seraient solidifiés, puis refroidis lentement. L'absence de charbon de bois dans les fragments analysés et sa quasi-absence dans les résidus que nous avons broyés, l'homogénéité des matrices silicatées, tous ces éléments associés témoignent d'une bonne adéquation entre le débit d'air et la vitesse de descente du chargement à l'intérieur de la cuve. Ces déductions nous amènent logiquement à la ventilation et à la construction en élévation.

### 2.3 – *L'alimentation en air*

Les 70 fragments de tuyères retrouvés en fouille présentent la même couleur et la même texture. Tous montrent des empreintes de tiges végétales en surfaces externe et interne et plusieurs d'entre eux des canalicules dans l'épaisseur. Il en est de même pour l'embout pris à 60° dans la scorie. De l'argile mélangée à de la paille a donc été utilisée pour la fabrication de ces conduits. Leurs diamètres extérieurs sont compris entre 70 et 100 mm pour des diamètres internes de 35 à 55 mm ; celui de l'embout pris à 60° mesure 50 mm. Les épaisseurs varient de 19 à 31 mm avec une forte concentration autour de 20 mm. Six demi embouts scoriacés et brisés, de faible longueur, se rattachent à au moins trois tuyères distinctes. Six proximités d'embouts également scoriacés retrouvés à leur entour ne se raccordent ni entre eux ni avec les embouts incomplets. Seule une moitié de conduit scoriacé sur 100 mm a pu être reconstituée à partir de quatre fragments (fig. 6). Sa légère conicité interne donne à penser que le pisé utilisé pour sa fabrication avait été modelé autour d'un bâton taillé en tronc de cône. Le très faible taux des remontages sous-tend qu'une proportion importante des conduits, à la différence des scories, a été emportée par l'érosion, les parties insuffisamment cuites ou non cuites ayant probablement fondues dans les intempéries. De ces analyses on peut retenir qu'au moins trois tuyères, en plus de celle inclinée à 60°, ont été utilisées simultanément ou successivement dans des positions indéterminables au cours de la réduction. Des soufflets dont on ignore le type<sup>7</sup>, actionnés devant le conduit incliné, permettaient d'insuffler de l'air vers la base du four. Cet air remontait ensuite par convection dans la cuve et permettait au charbon de se consumer et de produire le monoxyde de carbone indispensable pour la réduction des oxydes de fer contenus dans le minerai. Ces réactions entraînaient l'agglomération progressive du fer à l'état solide, avec pour finir, la liquéfaction de la gangue stérile au voisinage immédiat des tuyères, là où les températures étaient les plus élevées. La tuyère inclinée à 60° vers la partie basse et centrale du four bourrée de végétaux ne s'est probablement obturée qu'à la fin du processus, lorsque le niveau du bain silicaté accumulé dans la fosse est arrivé à hauteur de son nez.

### 2.4 – *La superstructure et le prélèvement de l'éponge de fer*

Un dispositif de soutènement s'imposait pour permettre la fixation de la tuyère à 60° (fig. 7). D'autre part, les quelques 90 kg de scorie produits impliquent un enfournement conséquent de minerai de fer et de charbon de bois et, par là, la construction d'une superstructure. Diverses reconstitutions et expérimentations permettent l'estimation du volume du chargement (Leroy et *al.* 2000 ; Martinelli 2000).

---

<sup>7</sup> On peut imaginer l'usage de soufflets tenus en main à corps simple ou double taillés dans du bois ou modelés en argile ou bien à poche en peau comme en utilisent aujourd'hui les forgerons africains.

La masse de charbons consommés au cours d'une réduction s'avère toujours au moins égale à celle du minerai réduit. Elle peut être jusqu'à six fois supérieure. De plus, la masse du minerai réduit est toujours forcément plus grande que la masse de scorie obtenue puisqu'il faut tenir compte dans le bilan matière, d'une part, de la masse de métal récupérée par les métallurgistes et, d'autre part, des pertes de poids induites par les éléments volatils contenus dans le minerai et évacués en fumées. En majorant de 20%, le chargement minimum en minerai et en charbon s'établit autour de 216 kg. En majorant de 50% (valeur qui reste conforme à certaines reconstitutions ; voir, par exemple, Martinelli 2000 et Seignobos 1991), la valeur passe à 270 kg. En retenant cette deuxième majoration tout en considérant la variation de 1 à 6 pour les rapports de masses charbon/minerai et en prenant en compte la masse volumique du minerai récolté (3,6 kg/dm<sup>3</sup>) et celle des charbons de *Prosopis africana* (0,8 kg/dm<sup>3</sup>), on arrive à un volume de chargement de 0,2 à 1,24 m<sup>3</sup>. En imaginant une structure en élévation de forme simple, cylindrique de 70 cm de diamètre intérieur pour circonscrire au plus près la fosse circulaire du four, sa hauteur devait être comprise entre 0,50 m et 3,2 m à supposer un chargement unique, valeurs qu'il convient de diminuer dans l'hypothèse de chargements successifs. En résumé, les facteurs à considérer sont trop nombreux pour que l'on puisse se prononcer sur l'élévation du four. Un point cependant paraît assuré : seul un four à « colonne » ou à « chambre fermée avec cheminée » chargé par le haut ou par une ou plusieurs ouvertures latérales pouvait permettre le traitement des quantités estimées. En effet, d'après les données ethnographiques, de simples fosses remplies de charbon et de minerai avec des tuyères posées sur les bords de l'excavation ou bien implantées rayonnantes sur une basse couronne d'argile ou encore placées sous une poterie hémisphérique renversée, permettent de réduire tout au plus une dizaine de kg de minerai à la fois (Celis 1991; Seignobos 1991).

Les vestiges à base d'argile cuite étalés à quelques mètres de l'emplacement du four constituent probablement, comme il a déjà été avancé au début de cet article, les restes de la superstructure sans laquelle 90 kg de scorie n'auraient jamais pu être obtenus au cours de l'opération de réduction. L'examen en laboratoire des matériaux récoltés renforce cette hypothèse. L'un des colombins mis au jour remonté à partir de trois fragments sur une longueur de 10 cm suit une courbure intérieure semblable au contour moulé de la scorie en portion de camembert (fig. 8) ; ce qui suggère que ce colomby a été modelé pour circonscrire au plus près la fosse creusée à la base du four. L'imbrication de ces colombins avec des galettes de terre cuite d'épaisseur centimétrique desquamées sous l'effet de la chaleur donne à penser que la construction étaient revêtue d'un enduit. Le sable grossier additionné à la glaise utilisée à cet effet visait probablement à améliorer le caractère réfractaire du crépissage et, par là, la résistance de la construction à des températures élevées. Rappelons en outre que des morceaux de tuyères en partie scoriacés sont apparus mêlés aux restes de cette construction attenante en partie haute à deux scories massives assimilées plus haut aux principaux fragments manquant du bloc qui s'était formé dans le fond du four. Cette imbrication suggère un déplacement simultané de la cuve et des quelques morceaux de scories accrochés à sa base. Si une telle manœuvre fut entreprise, c'est probablement parce qu'aucune ouverture appropriée n'était aménagée dans la maçonnerie pour atteindre l'éponge de fer. L'alternative choisie par les métallurgistes, fut non pas de la détruire à l'endroit même de sa construction, mais de la translater de 2 à 3 m. Dès lors à ciel ouvert, l'éponge de fer pouvait être extraite par martelage du bloc de scorie demeuré en place à la base du four.

## 2.5 – La masse de fer produit

Alain Ploquin a réalisé des analyses chimiques par spectrométrie d'émission sur deux morceaux de minerai (fig. 9) et sur la scorie demeurée en place dans le fond du four (fig. 10). Les teneurs en silice dans le minerai vont de 10 à 18% et celles en fer de 43 à 54%. Cette hétérogénéité de composition conjuguée à la proportion élevée de zirconium au regard de celles négligeables d'aluminium et de béryllium, confirme l'origine gréseuse du minerai révélée visuellement par sa texture grenue. Les analyses sur la scorie du fond du four ont été effectuées sur sa partie moulée dense et verdâtre (échantillon n°2187) et en son centre, vacuolaire et grisâtre (échantillon n°2186). La filiation chimique entre le minerai et la scorie, attendue au vu des constats archéologiques et des examens métallographiques, se trouve confirmée par ces analyses : d'une part, les profils des terres rares au comportement lithophile montrent un bon parallélisme, et, d'autre part, les points représentatifs du minerai et de la scorie s'alignent dans le diagramme triangulaire  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (fig. 11). Cet alignement est logique car révélateur de l'appauvrissement de la scorie en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dû à la formation de métal et, conjointement, à son enrichissement en  $\text{SiO}_2$  (et, dans une moindre mesure, en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en partie favorisé par des apports d'origines diverses : fusion partielle de la superstructure et des tuyères, sédiment mêlé au charbon de bois ou adhérent au minerai. La scorie s'enrichit aussi en Ba, Ca, Cs, Hf, K, Mg, Rb et Sr, apportés par les cendres de charbon de bois, voire par certains composants organiques intégrés dans les parois maçonnées. Ces analyses permettent en outre une estimation de la masse de fer produit, moyennant plusieurs simplifications. Au niveau du minerai d'abord, nous ne considérons que le spécimen le plus riche en fer (n°2188) ; l'autre échantillon analysé (n°1872), eu égard à sa forte teneur en silice, s'il avait été traité par le four, n'aurait pas contribué à la formation de fer. D'autre part, notre approche ne tient compte que des trois composants chimiques principaux, à savoir  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total, renormés à 100%, hors pertes au feu. Cette simplification se justifie par le fait que ces oxydes représentent, à eux seuls, plus de 99% de la masse du minerai et de la scorie. Les pertes en poids total liés aux éléments volatils du minerai sont négligées, à défaut de pouvoir être évaluées suivant la méthode de Vincent Serneels (1995) ou bien suivant celle de Marc Leroy et Paul Merluzzo (1998). Ces deux méthodes imposent un grand nombre d'analyses chimiques, y compris celle des parois des fours auxquelles nous n'avons pas procédé. Les expérimentations menées par Marc Leroy et *al.* (2000) montrent combien l'estimation de ces pertes est difficile. De nombreux paramètres conditionnent leur valeur : la nature et le calibre du minerai, le préchauffage des fours, la cadence d'enfournement du minerai de fer et du charbon de bois, la vitesse de descente des charges successives, le débit d'air dans la superstructure et la hauteur de la cuve. Les apports de masse dus à la cendre de charbon de bois, à la fusion partielle des parois de la cuve et des tuyères et aux ajouts involontaires et/ou volontaires, sont également négligés dans notre bilan, à défaut ici encore de pouvoir être évalués. Autrement dit l'équation en unité de masse que nous retenons pour un bilan matière simplifié est la suivante : minerai réduit = scorie + fer métal. Rappelons que l'équation d'un bilan complet s'écrit comme suit : minerai réduit + charbons + ajouts involontaires (voire volontaires) = scorie + fer métal (Ploquin 1995). En estimant égale à 90 kg la masse de scorie produite, nous arrivons à 11,5 kg de fer brut. Tout ce fer n'a pas été récupéré par les métallurgistes puisque les micrographies sur scorie révèlent des inclusions métalliques dans la matrice silicatée. Mais précisons aussi que la masse de fer produit a pu être plus importante dès lors que l'on prend pour le minerai une teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total supérieure à celle considérée ci-dessus eu égard à la composition hétérogène du



grés ou bien encore que l'on majore le bilan de masse pour tenir compte des pertes de poids ou que l'on estime la masse de scorie obtenue supérieure à 90 kg.

### **3. Les apports de la fouille de Koussané**

Le four de réduction mis au jour à Koussané est le premier de l'Afrique de l'Ouest à être daté au C<sup>14</sup> à partir de charbons retrouvés inclus dans de la scorie. L'âge obtenu s'accorde avec la chronostratigraphie du gisement et avec les résultats préliminaires de la thermoluminescence effectués sur l'une des plaques d'argile cuite retrouvée dans la fosse du four au contact de la scorie. Un nouveau jalon chronologique se trouve ainsi fixé au tableau de l'histoire de la métallurgie du fer africaine : la production d'une éponge de fer à partir d'un minerai siliceux entre les III<sup>e</sup>-IV<sup>e</sup> siècles apr. J.-C. (intervalle de confiance de 95%) selon la filière de réduction directe dans un four qui se composait d'une cuvette au fond légèrement hémisphérique surmontée d'une cuve maçonnée à base de colombins et enduite d'argile sur une hauteur indéterminée. Une tuyère inclinée à 60° à travers le corps du four devant laquelle étaient actionnés des soufflets, fut utilisée pour l'occasion. Le furent aussi, d'après le nombre d'embouts scoriacés mis au jour, au moins trois autres conduits en pisé, mais on ignore à quel moment et dans quelle position. Au terme de l'opération, la cuve fut déplacée de quelques mètres afin de rendre accessible l'éponge métallique d'une dizaine de kg qui s'était formée au dessus de la scorie. Une fois extraite du four, celle-ci dut subir de nouveau l'épreuve des hautes températures dans des fours d'épuration et/ou dans des foyers de forge pour être débarrassée de ses impuretés et permettre la fabrication de demi-produits (loupes, lingots, ébauches,...) et/ou d'objets finis (outils, armes, parures, fers cérémoniels, instruments de musique...). Les témoins archéologiques de ces opérations post-réductions restent à découvrir et leur histoire encore à écrire en parallèle avec celle indissociable des procédés de réduction directe des minerais de fer pour laquelle les informations se précisent régulièrement depuis une trentaine d'années.

### **Remerciements**

Je remercie :

- Kléna Sanogo, Directeur de l'Institut des Sciences Humaines de Bamako, et Mamadi Dembélé, Directeur du département d'Archéologie, pour les suites favorables qu'ils ont données à mes projets de recherches archéologiques dans la vallée de la Kolimbiné au cours des années 1990,
- le Ministère de la Coopération française, l'Agence de Coopération Culturelle et Technique et la Fondation Singer-Polignac pour avoir soutenu financièrement ces recherches,
- Philippe Fluzin, Pierre Guibert, Alain Ploquin, Christiane Rolando, Max Schvoerer, Emmanuel Vartagnan, Armelle Vienne pour leurs précieuses analyses en laboratoire auxquelles se réfère cet article,
- Dominique Commelin pour son aide dans mes recherches bibliographiques,
- Didier Ailloud, Alain Durand, Jean Riser, Famori Sissoko†, Gérard Vachon pour leur participation aux prospections, aux sondages et aux fouilles,
- les participants au séminaire annuel de paléométallurgie à Villersexel pour leurs stimulantes réflexions,

- l'équipe du Grand Filon et Bien Vivre en Val Gelon pour m'avoir invité à participer à leur colloque « Les chemins du fer ».

## Références bibliographiques

BREUNIG P., 2009 – « Cultural Change in the First Millenium BC – Evidence from Nigeria , West Africa », *in* : MAGNAVITA S., LASSINA KOTE, BREUNIG P., IDE O. A. (dir.), *Crossroads / Carrefour Sahel. Cultural and technological developments in first millenium BC/AD West Africa*. Africa Magna Verlag : Journal of African Archaeology Monograph Series, Vol. 2, p. 15-26.

CELIS G., 1991 – *Les fonderies africaines du fer, un grand métier disparu*. Frankfurt, Museum für Völkerkunde, 225 p.

DEME A., MCINTOSH S.K., 2006 – « Excavations at Walaldé : New light on the Settlement of the Middle Senegal Valley by Iron-Using Peoples », *Journal of African Archaeology*, vol. 4 (2), p. 317-347.

DUPUY C., FLUZIN P., PLOQUIN A., DURAND A., ROLANDO C., 2001/2002 – « Nouvelles données sur l'Age ancien des métaux au Mali », *Sahara*, 13, p. 61-90.

DUPUY C., ROLANDO C., 1999 – « Un four de métallurgie du fer en stratigraphie à Koussané (Mali) : fouille, anthracologie et datations sur charbons », *in* : EVIN J., OBERLIN C., DAUGAS J. P., SALLES J. F. (dir.), *<sup>14</sup>C et Archéologie*. Paris, Revue d'Archéométrie Supplément et Société Préhistorique Française, 26, p. 381-385.

ECHARD N., 1983 – « Scories et symboles. Remarques sur la métallurgie hausa du fer au Niger », *in* : ECHARD N. (dir.), *Métallurgies africaines, nouvelles contributions*. Paris, Mémoire de la Société des Africanistes, 9, p. 209-224.

EGGERT M.K.H., 2014 – « Early iron in West and Central Africa », *in* : BREUNIG P. (dir.), *Nok. African sculpture in archaeological context*. Frankfurt, Africa Magna, p. 51-59.

EICHHORN B., 2012 – « Woody resource exploitation for iron metallurgy of the Fiko Tradition : implications for the environmental history of the Dogon Country, Mali », *in* : ROBION-BRUNNER C. et MARTINELLI B. (dir.), *Métallurgie du fer et Sociétés africaines. Bilans et nouveaux paradigmes dans la recherche anthropologique et archéologique*, Oxford, Cambridge Monographs in African Archaeology 81, BAR International Series 2395, p.141-151.

FAGG B., 1969 – « Recent work in West Africa : new light on the Nok Culture », *World Archaeology*, Vol. 1, n° 1, Recent Work and New Approaches (Jun., 1969), p. 41-50.

FLUZIN P., 1996 – *Etudes métallographiques d'échantillons métallurgiques du site de Koussané (Haut-Sénégal – Mali)*. Belfort, Institut Polytechnique de Sévenans, étude non publiée, 7 p.

FLUZIN P., 2000 – *Etudes métallographiques d'une scorie de fond de four mise au jour à Koussané (Haut-Sénégal – Mali)*. Belfort, Institut Polytechnique de Sévenans, étude non publiée, 3 p.

FLUZIN P., BENOIT P., KIENON H.T., KIETHEGA J.B., EL KEDIM O., 1995 – « Apports de l'archéométrie à la restitution de la chaîne opératoire des procédés sidérurgiques directs à partir des vestiges archéologiques ; intérêt des comparaisons ethnoarchéologiques », in : MAGNUSSON G. (dir.), *The Importance of Ironmaking, Technical Innovation and Social Change*. Stockholm, p. 56-64.

HUYSECOM E., 1996 – *Inagina, l'ultime Maison du Fer*. Genève, PAVE. Film vidéo, 52 min.

LEROY M., MERLUZZO P., 1998 – *Les ateliers sidérurgiques médiévaux de Saint-Dizier (Haute Marne)*. Bulletin de la Société Archéologique Champenoise, 91, 4, 126 p.

LEROY M., MERLUZZO P., FLUZIN P., LECLERE D., AUBERT M., PLOQUIN A., 2000 – « La restitution des savoir-faire pour comprendre un procédé technique : l'apport de l'expérimentation en archéologie du fer », in : PETREQUIN P., FLUZIN P., THIRIOT J., BENOIT P. (dir.), *Arts du feu et productions artisanales*. Antibes, APDCA, p. 37-51.

LEVY-LUXEREAU A., 1983 – « Métallurgie dans le Sahel nigérien : contraintes de l'écosystème, effets de la technique. Un exemple de la région de Maradi (Niger) », in : ECHARD N. (dir.), *Métallurgies africaines, nouvelles contributions*. Paris, Mémoire de la Société des Africanistes, 9, p. 225-236.

MARET P. (de), 2002 – « L'Afrique centrale : le "savoir-fer" », in : BOCOUM H. (dir.), *Aux origines de la métallurgie du fer en Afrique. Une ancienneté méconnue. Afrique de l'Ouest et Afrique centrale*. Paris, Editions UNESCO, p. 123-131.

MARIAUX A., 1979 – *Nature et périodicité des cernes dans les arbres de la zone tropicale sèche en Afrique de l'Ouest*. Nogent sur Marne, Centre technique forestier tropical, division d'anatomie.

MARTINELLI B., 2000 – « Le choix de la combustion lente. Mutation technique et mutation sociale au Yatenga, Burkina Faso », in : PETREQUIN P., FLUZIN P., THIRIOT J., BENOIT P. (dir.), *Arts du feu et productions artisanales*. Antibes, APDCA, p. 123-142.

MAYDELL H.-J. (von), 1983 – *Arbres et arbustes du Sahel. Leurs caractéristiques et leurs utilisations*. Eschborn, Verlag Josef Margraf, 531p.

MCINTOSH S. K. (dir.), 1994 – *Excavations at Jenné-Jeno, Hambarketolo and Kaniana (Inland Niger Delta, Mali), the 1981 Season*. Berkeley and Los Angeles, University of California Press 20.

MCINTOSH S. K., MCINTOSH R. J., 1980 – *Prehistoric investigations in the Region of Jenne, Mali: a study in the development of Urbanism in the Sahel*. Oxford, Cambridge Monographs in African Archaeology 2, BAR International Series 89.

PLOQUIN A., 1995 – « Une base de données dévolue aux compositions chimiques des scories et produits associés à la paléosidérurgie », in : BENOIT P., FLUZIN P. (dir.), *Paléométallurgie du fer et cultures*. Belfort, Institut Polytechnique de Sévenans, A.E.D.E.H./Vulcain. p. 99-107.

SCHMIDT P. R., 1997 – *Iron Technology in East Africa. Symbolism, Science and Archaeology*. Bloomington/Indianapolis, Indiana University Press, 328 p.

SEIGNOBOS C., 1991 – « Les Murgur ou l'identification ethnique par la forge (Nord Cameroun) ; annexe : trois réductions du fer », in : MONINO Y. (dir.), *Forges et forgerons*. Actes du IV<sup>e</sup> colloque Méga-Tchad, Vol. I, Edit. Orstom, p. 43-226.

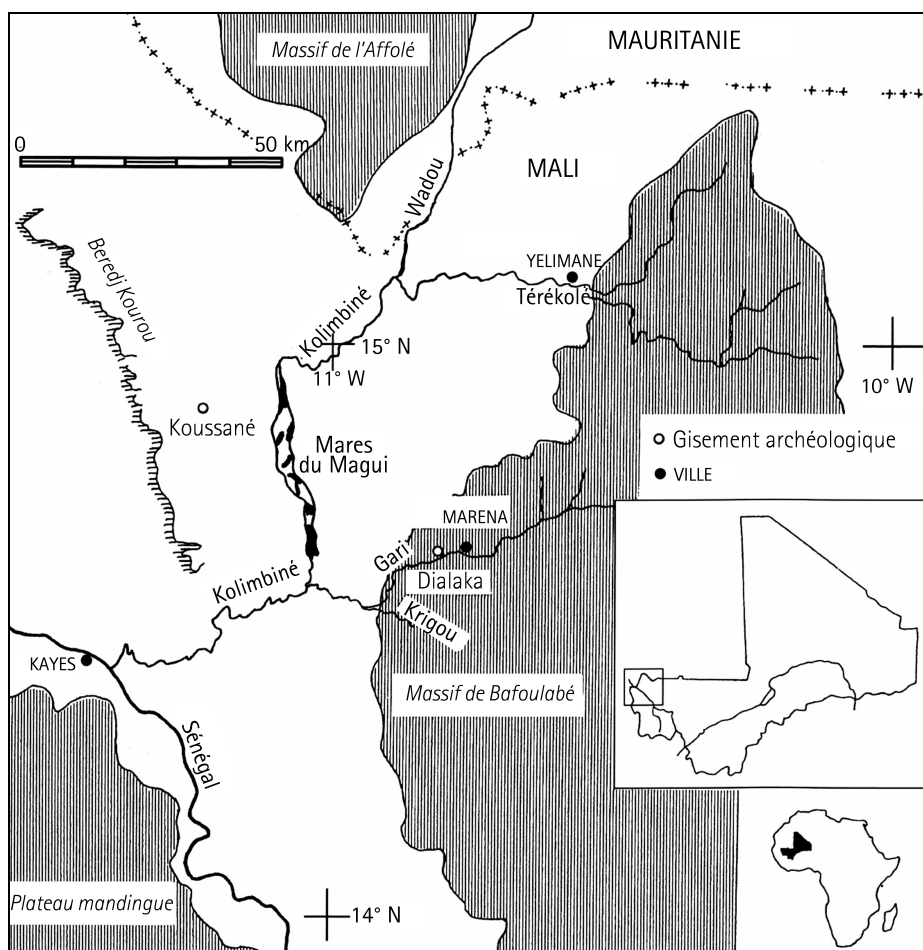
SERNEELS V., 1993 – *Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*. Lausanne, Cahiers d'Archéologie Romande, 67, 240 p.

SERNEELS V., 1995 – « A propos de quelques scories : le fer en Suisse romande », in : BENOIT P., FLUZIN P. (dir.), *Paléométallurgie du fer et cultures*. Belfort, Institut Polytechnique de Sévenans, A.E.D.E.H./Vulcain. p. 21-28.

SERNEELS V., 1998 – « La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne », in : FEUGERE M., SERNEELS V. (dir.), *Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale*. Montagnac, Monographies instrumentum, 4, p. 7-44.

TYLECOTE R. F., 1975 – « Iron Smelting at Taruga, Nigeria », *Journal of the Historical Metallurgy Society*, 5, p. 1-9.

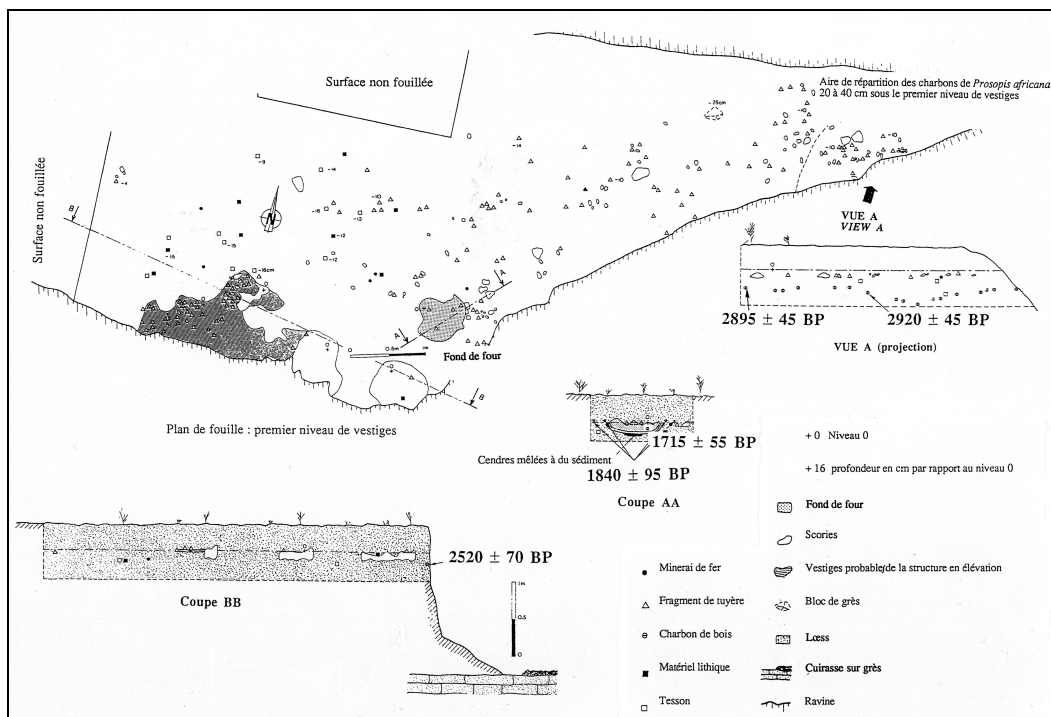
VARTAGNAN E., GUIBERT P., SCHVOERER M., 2000 – *Evaluation de la databilité par thermoluminescence de fragments de four d'un atelier sidérurgique de Koussané, Mali*. Centre de Recherche en Physique Appliquée à l'Archéologie, Bordeaux 3, Etude non publiée, 9 p.



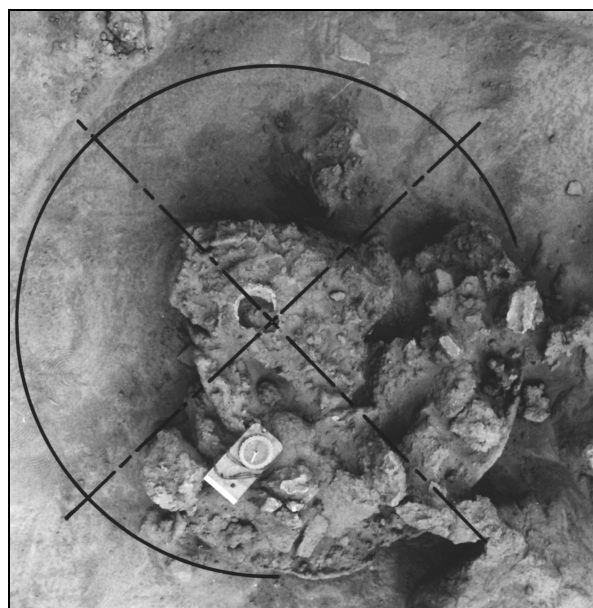
**Fig. 1** – Situation géographique de Koussané.



**Fig. 2** – Terrains en pente douce entaillés par l'érosion au voisinage de Koussané.

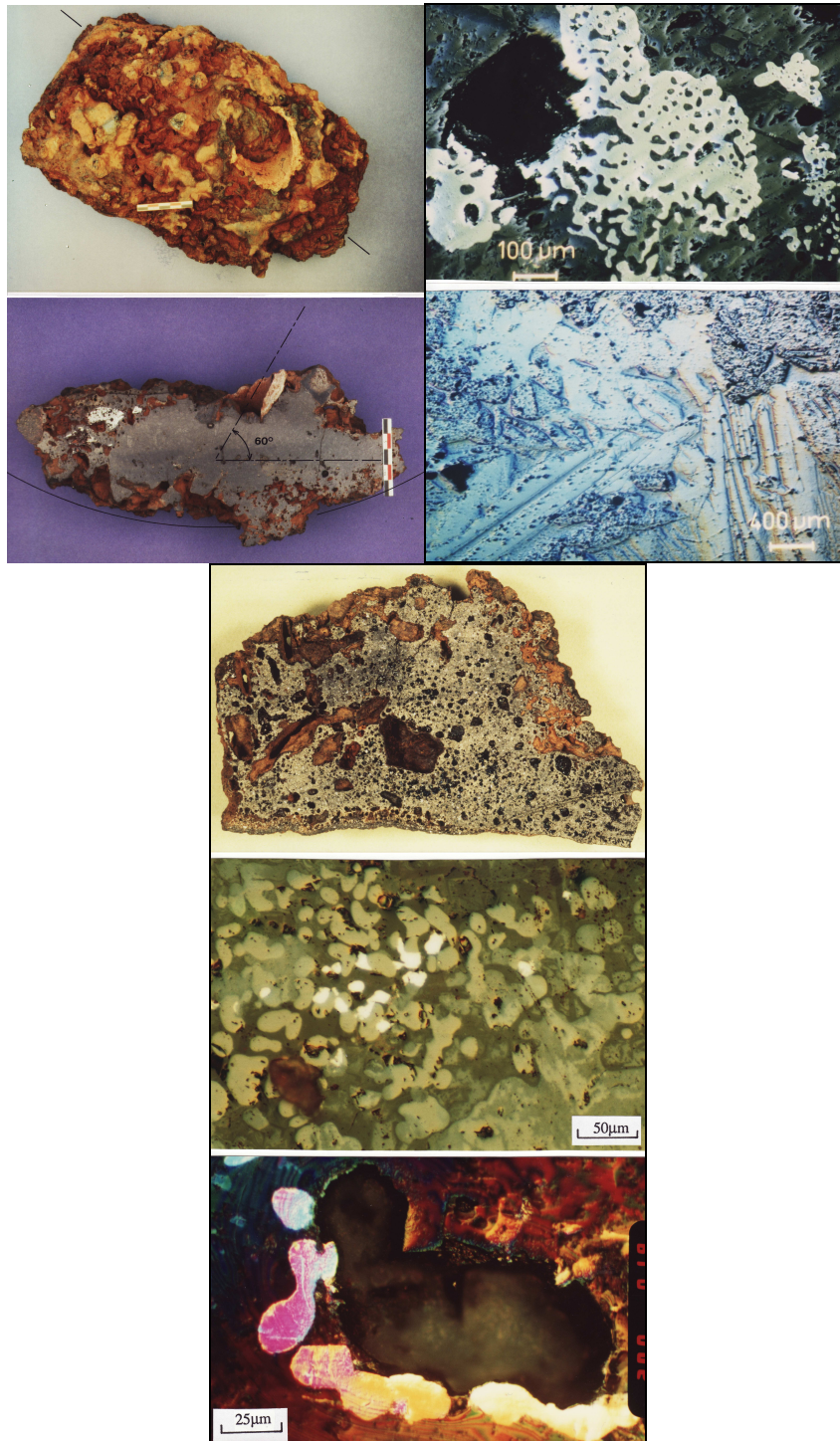


**Fig. 3** – Relevé de fouille : répartition des vestiges du niveau supérieur et position des charbons de bois datés.



**Fig. 4** – Le bloc de scorie le plus volumineux du gisement intégrant un embout de tuyère. Son contour s'inscrit dans un cercle de 70 à 75 cm de diamètre.

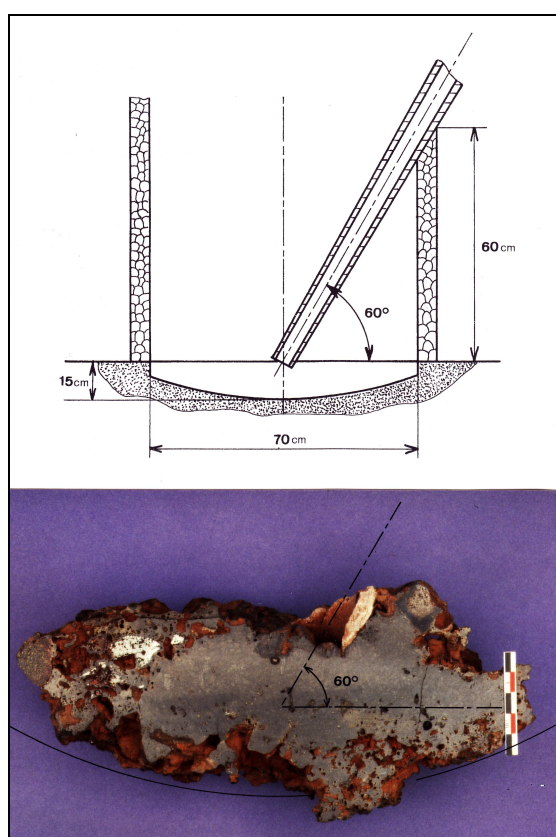




**Fig. 5** – **a.** Situation du plan de coupe analysé et macrographie montrant l’embout de tuyère à 60°. Un fragment d’éponge métallique apparaît en blanc, 10 cm à gauche de la tuyère. La surface inférieure courbe est constituée de cavités ouvertes représentant probablement des empreintes de charbons de bois. Cette morphologie implique, d’une part, un fond de four creusé en forme de cuvette légèrement hémisphérique et, d’autre part, l’emploi comme combustible de charbons de bois ; **b.** En haut, fer en cours de densification. En bas, matrice silicatée montrant des globules de wustite et de très grandes aiguilles de fayalite dans l’axe de la tuyère ; **c.** Plan de coupe analysé sur une deuxième scorie volumineuse du gisement. Macrographie et micrographies caractéristiques d’une scorie de réduction s’étant écoulée, puis solidifiée lentement dans un fond de four (photos P. Fluzin).



**Fig. 6** – Une proximité d’embout scoriacé (à gauche, en bas) à côté des six fragments d’embouts mis au jour (celui au centre de la photo est remonté à partir de quatre fragments).



**Fig. 7** – Hypothèse de reconstitution du four de Koussané à partir des vestiges archéologiques. Seule la tuyère traversant à l’oblique le corps du four est représentée dans la position révélée par la macrographie, avec son embout à 60°. L’emplacement des autres tuyères utilisées pour la réduction est impossible à établir à partir des données de la fouille. Pour la commodité du dessin, la structure en élévation est représentée d’un seul tenant, cylindrique et droite. Mais peut-être était-elle voûtée ou tronconique, inclinée ou faite de plusieurs éléments ?





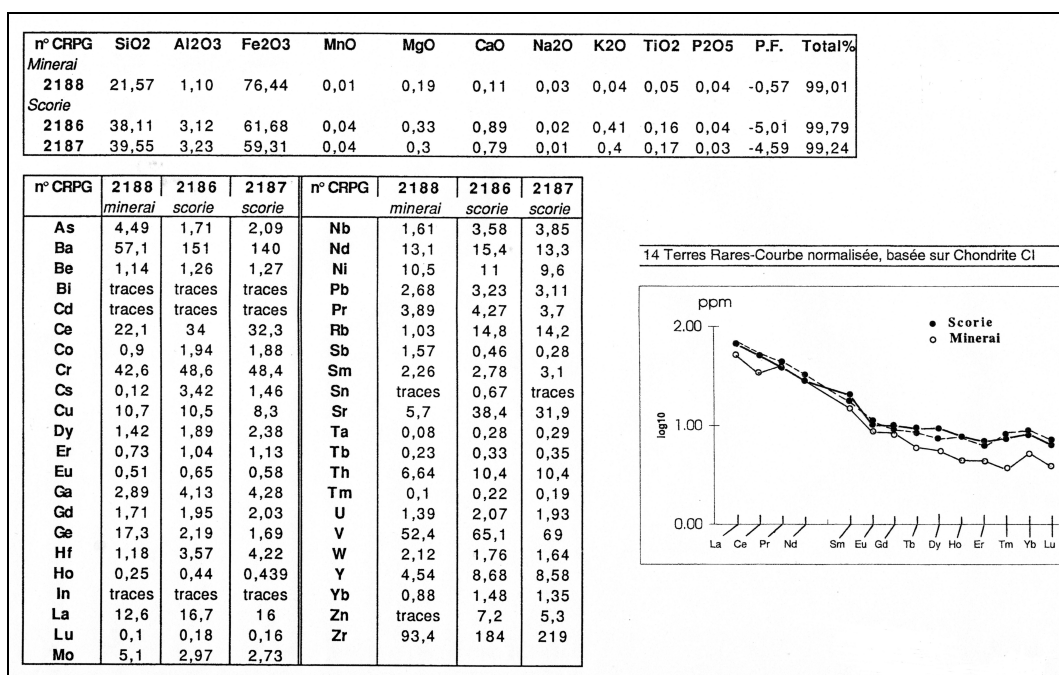
**Fig. 8** – Colombin et bloc de scorie montrant deux courbures identiques.

n° CRPG	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	P.F.	Total%
1872	38,34	0,75	61,52	0,00	0,07	0,00	0,00	0,02	0,03	0,14	-0,82	100,1
2188	21,57	1,10	76,44	0,01	0,19	0,11	0,03	0,04	0,05	0,04	-0,57	99,01

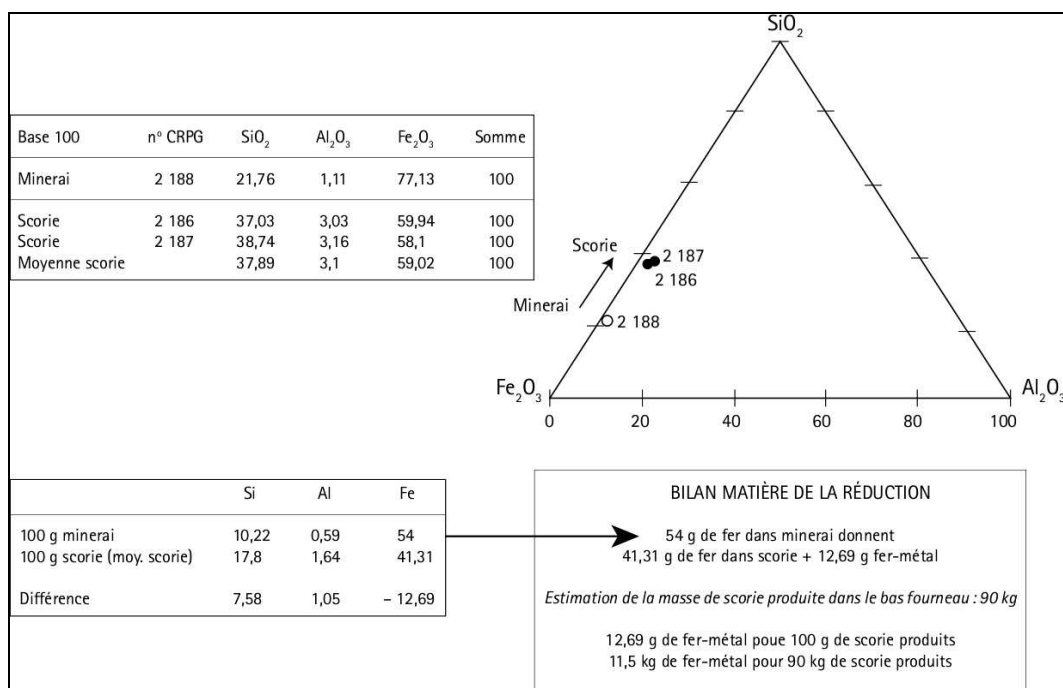
n° CRPG	1872	2188	n° CRPG	1872	2188
As	n. d.	4,49	Nb	2,53	1,61
Ba	7,93	57,1	Nd	n. d.	13,1
Be	0,29	1,14	Ni	5,49	10,5
Bi	n. d.	traces	Pb	n. d.	2,68
Cd	n. d.	traces	Pr	n. d.	3,89
Ce	n. d.	22,1	Rb	0,66	1,03
Co	0,72	0,9	Sb	n. d.	1,57
Cr	44,2	42,6	Sm	n. d.	2,26
Cs	n. d.	0,12	Sn	n. d.	traces
Cu	12,3	10,7	Sr	1,17	5,7
Dy	n. d.	1,42	Ta	n. d.	0,08
Er	n. d.	0,73	Tb	n. d.	0,23
Eu	n. d.	0,51	Th	10	6,64
Ga	1,6	2,89	Tm	n. d.	0,1
Gd	n. d.	1,71	U	n. d.	1,39
Ge	n. d.	17,3	V	n. d.	52,4
Hf	n. d.	1,18	W	n. d.	2,12
Ho	n. d.	0,25	Y	63,5	4,54
In	n. d.	traces	Yb	n. d.	0,88
La	n. d.	12,6	Zn	4,22	traces
Lu	n. d.	0,1	Zr	122	93,4
Mo	n. d.	5,1			



**Fig. 9** – Le minéral (analyses A. Ploquin) : éléments chimiques majeurs en % (P. F. = Pertes au Feu) et éléments traces (ppm = partie par million, n. d. = non détecté).



**Fig. 10** – Eléments chimiques majeurs en % et éléments traces en ppm contenus dans la scorie comparés à ceux contenus dans le fragment de minerai le plus riche en fer (se reporter à la figure 9). Spectres des terres rares contenues dans le minerai et dans la scorie (analyses A. Ploquin).



**Fig. 11** – Bilan matière simplifié de la réduction, établi à partir des résultats des analyses chimiques par spectrométrie d'émission réalisées sur le minerai et sur la scorie du fond du four (valeurs déduites des analyses chimiques présentées sur les figures 9 et 10).